

Pomiary charakterystyk dynamicznych jako element projektowania wspomaganego badaniami przy wyznaczaniu obciążenia wiatrem stalowych wież kratowych wg Eurokodu

Marcin Skwarek¹, Jacek Hulimka²

¹ *Pracownia Projektowa M.Skwarek J.Hulimka Sp. J., e-mail: marcin.skwarek@pracowniaprojektowa.com.pl*

² *Katedra Inżynierii Budowlanej, Wydział Budownictwa, Politechnika Śląska, e-mail: jacek.hulimka@polsl.pl*

Streszczenie: Dotychczasowe publikacje autorów, związane z obliczaniem stalowych wież kratowych wg norm Eurokod, wskazywały między innymi na specyfikę i złożoność tego procesu, w porównaniu do prac wykonywanych na podstawie poprzednich norm krajowych. Niniejsza praca opisuje już przeprowadzone oraz planowane przez autorów prace badawcze, związane z pomiarami charakterystyk dynamicznych przedmiotowych konstrukcji, wraz z ogólnym podaniem uzyskanych do tej pory wyników. Pomiary takie rozpatrywane są tu jako jedna z metod doświadczalnych, dopuszczanych normami PN-EN, możliwa do wykorzystania, szczególnie w ocenie nośności istniejących obiektów.

Słowa kluczowe: stalowe wieże kratowe, obciążenie wiatrem wież kratowych.

1. Wprowadzenie

W wieloletniej już praktyce zawodowej autorów referatu szczególne miejsce zajmują prace związane z oceną nośności i projektowaniem stalowych wież kratowych, w większości stanowiących konstrukcje wsporcze instalacji telekomunikacyjnych oraz systemów antenowych stosowanych w radiodifuzji. Jak opisywano wcześniej, np. w pracy [1], wprowadzenie norm PN-EN uczyniło obliczanie tego typu konstrukcji żmudnym i skomplikowanym procesem, szczególnie w odniesieniu do funkcjonujących wcześniej norm krajowych. Co więcej, przedstawione choćby w pracy [2] zamienne procedury Eurokodu, prowadzą często do istotnie rozbieżnych, choć równoprawnych wyników obliczeń. Taki stan rzeczy skłonił autorów do sięgnięcia po dopuszczane normami metody doświadczalne. W pierwszej kolejności, kierując się zapisami normy [3], rozpoczęto prowadzenie pomiarów charakterystyk dynamicznych (własnych) stalowych wież kratowych, jako potencjalnie najprostszych do zrealizowania. Opis wykonanych już pomiarów, wynikające z nich wstępne wnioski oraz plany dalszych badań przedstawiono w dalszych rozdziałach.

2. Pomiary charakterystyk dynamicznych wież, a postanowienia normowe, definicje podstawowych wielkości i studium literatury

Normy Eurokod dopuszczają stosowanie metod doświadczalnych pod hasłem *projektowania wspomaganego badaniami*, z czego wynika brzmienie tytułu niniejszej pracy. Pierwsza z reguł normy [3], wiodącej dla rozpatrywanych tu konstrukcji, podaje w tym zakresie, iż w projektowaniu wspomaganym badaniami stosuje się postanowienia [4]. Ten z kolei dokument, podstawowy dla zbioru norm Eurokod, w załączniku D określa rodzaje dopuszczanych badań oraz podaje wskazówki dotyczące ich planowania i opracowywania wyników, w tym ogólne zasady oceny statystycznej. Wśród pozycji wymienionych w regule (1) punktu D3 [4] odnajdujemy dopuszczenie badań kontrolnych w celu sprawdzenia rzeczywistego zachowania się konstrukcji lub jej elementów, w tym określenia częstotliwości drgań lub wielkości tłumienia. Zastosowanie wyników pomiarów opisywanych w niniejszej pracy, w obliczeniach prowadzonych wg norm PN-EN, zostaje

zatem usankcjonowane regulami tychże norm, co oczywiste, po spełnieniu ich ogólnych wymagań. Należy tu wspomnieć, iż norma [3] w zakresie wyznaczania wartości logarytmicznego dekrementu tłumienia konstrukcyjnego drgań δ_s odsyła do postanowień załącznika D normy [5], wśród których jako najistotniejsze uznać należy wymienione niżej procedury pomiaru logarytmicznego dekrementu tłumienia:

- jako sygnały pomiarowe mogą być rejestrowane wartości przyspieszenia, przemieszczenia, sił lub odkształceń konstrukcji,
- do wyznaczenia wartości δ_s można stosować metodę krzywej zaniku drgań, metodę autokorelacji lub metodę połowy szerokości pasma (opisane np. w monografii [6] lub w artykule [7]),
- pomiary powinny uwzględniać całą energię drgań, dlatego prowadzi się je jednocześnie w dwóch prostopadłych kierunkach,
- amplituda podczas badań powinna mieścić się w zakresie przewidywanych wielkości amplitud drgań.

Norma [5] odwołuje się tu także do podanej w [8] definicji całkowitego logarytmicznego dekrementu tłumienia drgań (dla podstawowej, pierwszej postaci), którą wyraża wzór:

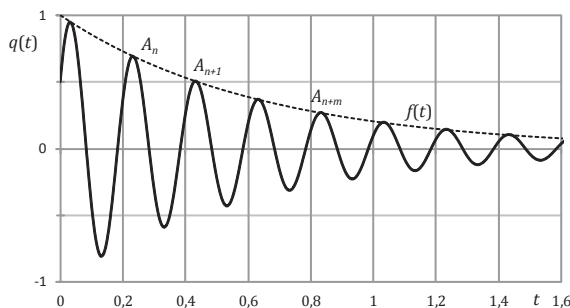
$$\delta = \delta_s + \delta_a + \delta_d \quad (1)$$

gdzie δ_s to logarytmiczny dekrement tłumienia konstrukcyjnego, δ_a to logarytmiczny dekrement tłumienia aerodynamicznego, a δ_d – logarytmiczny dekrement tłumienia wynikający z zastosowania urządzeń tłumiących (jeśli takie występują). Definicja ta zwraca zatem uwagę przede wszystkim na konieczność uwzględniania ewentualnego wpływu oddziaływania wiatru w trakcie prowadzonych pomiarów i wynikającego z tego aerodynamicznego tłumienia drgań konstrukcji. Wspomnieć można tu także, że norma [3] zwraca również uwagę na fakt, iż częstotliwość drgań własnych zmienia się zależnie od warunków obciążenia, co wydaje się jednak oczywistym, szczególnie w przypadku sił masowych, w tym pochodzących od ewentualnego oblodzenia wieży.

Rozważania drgań przedmiotowych obiektów, a w szczególności określenie ich podstawowych wielkości własnych, sprowadzają się do zagadnień związanych z dynamiką układu o jednym stopniu swobody. Pomijając zbędne w tym miejscu wyprowadzenia, w tym rozwiązania równań ruchu drgań swobodnych i tłumionych, podać należy jedynie zależności opisujące wybrane wielkości podstawowe, przywoływane w dalszej treści pracy. I tak, elementarnym będzie tu pojęcie częstotliwości drgań własnych n , którą opisać można zależnością:

$$n = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \text{ [Hz]} \quad (2)$$

gdzie ω jest częstością kołową drgań swobodnych, k oznacza sztywność układu drgającego (w kierunku drgań) a m jego masę. Dalej, istotnymi dla niniejszej pracy będą wielkości charakteryzujące tłumienie (konstrukcyjne) drgań swobodnych, o przykładowym przebiegu jak na rys. 1.



Rys. 1. Przykład przebiegu drgań swobodnych podkrtycznie tłumionych

Wielkością, którą można uznać za elementarną, jest tu tzw. liczba tłumienia ξ , definiowana jako ułamek (procent) tłumienia krytycznego (stopień tłumienia). Ponieważ wielkość tłumienia drgań określana jest w praktyce na drodze doświadczalnej, do jej scharakteryzowania używa się tzw. logarytmicznego dekrementu tłumienia drgań, zdefiniowanego jako logarytm naturalny ze stosunku kolejnych amplitud drgań o tych samych znakach (jak na rys. nr 1), co wyraża równanie:

$$\delta_s = \frac{1}{m} \ln \frac{A_n}{A_{n+m}}, \text{ lub dla } m = 1 \quad \delta_s = \ln \frac{A_n}{A_{n+1}} \quad (3)$$

przy czym w praktyce łatwiejszym do wykonania jest pomiar przyspieszeń drgań, stąd stosowane będą tu także amplitudy przyspieszeniowe. Logarytmiczny dekrement tłumienia drgań oraz liczbę tłumienia (ułamek tłumienia krytycznego) wiąże zależność:

$$\delta_s = \frac{2\pi\xi}{\sqrt{1-\xi^2}}, \quad (4)$$

a dla $\xi \ll 1$, w przybliżeniu:

$$\delta_s \approx 2\pi\xi \quad (5)$$

Należy tu zaznaczyć, że przytoczone wyżej wielkości opisujące tłumienie, a w szczególności zależność definiująca logarytmiczny dekrement tłumienia, dotyczą teoretycznego przypadku wiskotycznego tłumienia drgań swobodnych. W rzeczywistych układach, gdzie pojawia się złożony model tłumienia, na który składają się co najmniej tłumienie tarcieniem konstrukcyjnym oraz wewnętrznym (materiałowym), wielkość logarytmicznego dekrementu tłumienia zależna będzie także od amplitudy początkowej drgań swobodnych, co opisane zostało np. w pracy [9]. Wyjaśnia to, przytoczoną wyżej, jedną z procedur [5] pomiarów tejże wielkości (dotyczącą wielkości amplitud podczas badań).

Przeprowadzone studium literatury pokazuje, że opisane pomiary cech dynamicznych istniejących stalowych wież kratowych stanowią w większości przypadki jednostkowe, co szczególnie dotyczy doświadczalnego ustalenia wielkości charakteryzujących tłumienie drgań. Dodatkowo, dostępne źródła pokazują dość istotny rozrzut tychże wielkości. Sięgając od normy [8], z tabeli F.2 odczytujemy wielkości logarytmicznego dekrementu tłumienia konstrukcyjnego drgań w pierwszej (podstawowej) postaci, wynoszące odpowiednio: 0,02 dla konstrukcji spawanych, 0,03 dla konstrukcji łączonych na śruby wysokiej wytrzymałości oraz 0,05 – łączonych na śruby zwykłe. Wg normy [10], co przytoczono także w pracy [11], stosowane były wielkości logarytmicznego dekrementu tłumienia konstrukcyjnego drgań równe: 0,06 dla konstrukcji spawanych oraz 0,08 dla konstrukcji łączonych na śruby. Przedstawione w pracy [12] zalecenia IASS (International Association for Shell and Spatial Structures) podają z kolei następujące wielkości liczby tłumienia (ułamka tłumienia krytycznego): 0,012 dla konstrukcji spawanych, 0,02 dla konstrukcji skręcanych na śruby wysokiej wytrzymałości oraz 0,03 – skręcanych na śruby zwykłe, co po przeliczeniu na wielkość logarytmicznego dekrementu tłumienia wg równania (5) daje w przybliżeniu wartości, odpowiednio: 0,075, 0,125 oraz 0,188. Jednocześnie, w pracy [12] przytoczono wyniki pomiarów dwóch wież kratowych, gdzie dla wieży o wysokości 101 m, przy zmierzonej częstotliwości drgań własnych w pierwszej postaci 1,13 Hz, uzyskano stopień tłumienia 0,0246 ($\delta_s \approx 0,154$), natomiast dla wieży o wysokości 52,1 m i zmierzonej częstotliwości drgań własnych w pierwszej postaci równej 1,3 Hz, ustalono stopień tłumienia równy 0,016 ($\delta_s \approx 0,10$). Z kolei z pomiarów wież opisanych w artykułach [13] i [14] wynikają wielkości ułamka tłumienia krytycznego równe od 0,011 ($\delta_s \approx 0,069$) do 0,003 ($\delta_s \approx 0,019$). Można tu jeszcze przedstawić zakres wartości logarytmicznego dekrementu tłumienia konstrukcyjnego drgań dla wież stalowych, podany na podstawie studium literatury w pracy [6], tj. od 0,013 do 0,182. Wartym przytoczenia jest tu także artykuł [15], w którym opisano przeprowadzone pomiary tłumienia obiektów o nieco odmiennej konstrukcji, lecz takim samym charakterze (schemacie) – pełnościennych słupów, wiotkich w porównaniu z wieżami kratowymi (np. oświetleniowych). Wnioski tejże pracy wskazują jednak wyraźnie na zależność wartości

logarytmicznego dekrementu tłumienia konstrukcyjnego drgań (czy też stopnia tłumienia) od amplitudy początkowej.

Lektura niektórych z przywołanych w pracy publikacji pokazała jeszcze jeden aspekt związany z pomiarami charakterystyk dynamicznych stalowych wież kratowych. Otóż, np. w pracach [12] i [16] podano proste, wyraźnie empiryczne zależności, opisujące częstotliwość drgań własnych wież n_1 w pierwszej postaci (giętej). I tak, w ślad za [12] i [16], na podstawie normy australijskiej, podać można zależność:

$$n_1 \approx 1500 \cdot \frac{b_a}{H^2} \quad (6)$$

gdzie b_a jest średnią szerokością boku trzonu kratowego wieży (obliczaną jako stosunek pola powierzchni rzutu ściany wieży do jej wysokości H – przypis autorów). Jak podają obydwie źródła, równanie to jest jednak słuszne jedynie dla wież bez zamontowanego wyposażenia (o istotnej, dodatkowej masie). Dla wież z zamontowanym wyposażeniem w okolicy wierzchołka, o masie M , w pracy [16] podano następujący wzór korygujący:

$$n_1^M = n_1 \sqrt{\frac{M_1}{M_1 + M}} \quad (7)$$

gdzie n_1 jest częstotliwością drgań własnych wyznaczoną ze wzoru (6), a M_1 to masa równoważna konstrukcji wieży. Ponadto, w pracy [16] podano następujący wzór alternatywny dla wież z zamontowanym wyposażeniem:

$$n_1 = \left(\frac{L_N}{H} \right)^{2/3} \left(\frac{b_b}{H} \right)^{1/2} \quad (8)$$

gdzie b_b to szerokość podstawy trzonu wieży, a L_N to parametr wynoszący odpowiednio 270 dla konstrukcji o podstawie kwadratu oraz 230 dla wież o podstawie trójkąta.

Stosowanie tak prostych wzorów pozwala na istotne ograniczenie nakładu pracy przy wyznaczaniu zastępczego obciążenia wiatrem wież, szczególnie w przypadkach, kiedy analizę obiektu można zamknąć na poziomie porównania wielkości oddziaływań w kolejnych schematach obciążenia. W innych przypadkach, dla wyznaczenia częstotliwości drgań własnych niezbędne jest przeprowadzenie analizy modalnej konstrukcji lub stosowanie wzorów ogólnych, wynikających z zależności (2), podanych np. w normach [4], [10] i [17] czy też w pracy [11], co wymaga wcześniejszego wyznaczenia zastępczej sztywności trzonu wieży. Odpowiednia seria pomiarów częstotliwości drgań własnych realizowanych w Polsce wież pozwoliłaby zatem na potwierdzenie lub zweryfikowanie przytoczonych wyżej zależności empirycznych.

3. Zakres i metodyka pomiarów

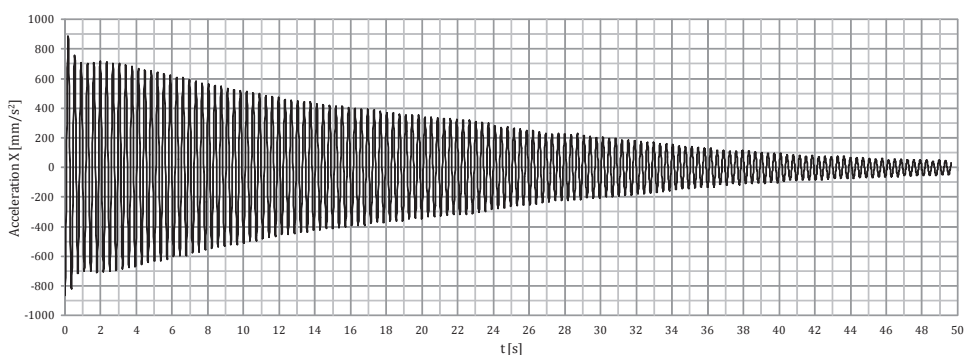
Do celów doświadczalnego ustalenia częstotliwości drgań własnych stalowych wież kratowych w pierwszej postaci (giętej) oraz odpowiadającej jej wartości logarytmicznego dekrementu tłumienia konstrukcyjnego drgań, rejestrowano przebiegi przyspieszeń drgań (zwykle na wierzchołku wieży lub w jego pobliżu), po wzbudzeniu impulsowym. Do rejestracji sygnałów stosowano trójosiowy analizator drgań, podłączony do przenośnego komputera osobistego. Podstawowe parametry techniczne stosowanego urządzenia są następujące (wg specyfikacji technicznej podanej przez producenta):

- max rejestrowane wartości przyspieszeń drgań: $\pm 5 \text{ g}$ ($\approx \pm 50\,000 \text{ mm/s}^2$),
- rozdzielczość: $2,5 \text{ mm/s}^2$,
- zakres częstotliwości drgań: $0 - 2500 \text{ Hz}$,
- częstotliwość próbkowania: $\max 2^{13} \text{ próbek/s}$ (8192 Hz).

W przeprowadzonych do chwili obecnej pomiarach, wymuszenia impulsowe poziomych drgań konstrukcji realizowano poprzez balans ciałem osoby (osób) znajdującej się na szczycie wieży. Działanie takie jest wystarczające z punktu widzenia pomiarów częstotliwości drgań własnych, nie daje jednak możliwości kontroli amplitudy początkowej drgań. Dlatego też, w najbliższym czasie, autorzy planują przeprowadzenie serii pomiarów, w których wymuszenie impulsowe realizowane będzie poprzez zerwanie odpowiednio

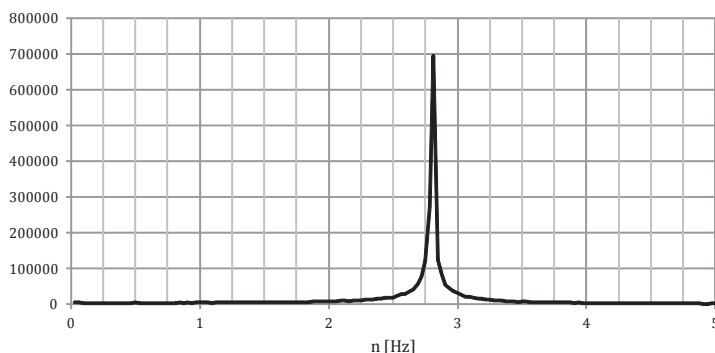
napiętej liny, zaczepionej na wierzchołku trzonu wieży, przy czym kontrolowana będzie siła naciągu wstępnego (przy ustalonym położeniu zaczepu liny w poziomie 0).

Wzbudzenia drgań konstrukcji dokonywane są w czasie względnej ciszy wiatrowej, tzn. przy braku odczuwalnych podmuchów wiatru (na wysokości pomiarowej), co na obecnym etapie doświadczeń pozwala przyjąć brak wpływu tłumienia aerodynamicznego. W przypadku każdego obiektu rejestrowanych jest kilka (od czterech do ośmiu) przebiegów zmienności przyspieszeń drgań, przy czym przed rozpoczęciem pomiarów ustalany jest kierunek amplitud w pierwszej, gładkiej postaci drgań własnych (na podstawie analizy modalnej lub wstępnych badań). Pozwala to na takie usytuowanie czujnika, aby kierunek drgań konstrukcji w przybliżeniu był zgodny z jednym z dwóch prostopadłych kierunków poziomych, w których rejestrowane są przyspieszenia drgań. Po zarejestrowaniu kolejnych sygnałów prowadzona jest obróbka danych, którą rozpoczyna przefiltrowanie sygnałów, z zastosowaniem filtra dolnoprzepustowego, o wartości 4 lub 8 Hz. Przykład tak przefiltrowanego sygnału przedstawiono na rysunku poniżej.



Rys. 2. Przykład przefiltrowanego sygnału opisującego zarejestrowany przebieg zmienności przyspieszeń poziomych drgań wieży kratowej, po wymuszeniu impulsowym

W dalszej kolejności prowadzona jest analiza widmowa każdego z przefiltrowanych sygnałów dyskretnych, mająca na celu wyznaczenie podstawowej częstotliwości drgań własnych. W tym celu obliczona jest Dyskretna Transformata Fouriera, z zastosowaniem metody Szybkiej Transformacji Fouriera (ang. FFT). Przykład uzyskanego widma częstotliwościowego przebiegu czasowego przyspieszeń drgań jak na rys. 2, przedstawia poniższy rysunek. Odczytana z tego wykresu wartość ekstremum odpowiada poszukiwanej częstotliwości drgań własnych konstrukcji w pierwszej postaci.

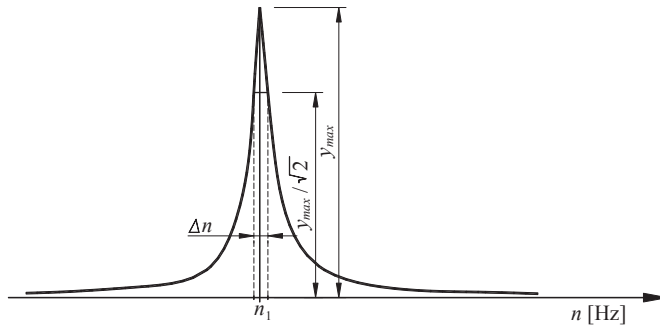


Rys. 3. Widmo częstotliwościowe sygnału przedstawionego na rys. 2 – wykres transformaty Fouriera

Na podstawie uzyskanych danych jw., dla każdego z zarejestrowanych sygnałów dyskretnych możliwe jest wyznaczenie logarytmicznego dekrementu tłumienia konstrukcyjnego drgań. Stosowane są dwie metody. Pierwszą z nich jest metoda połowy

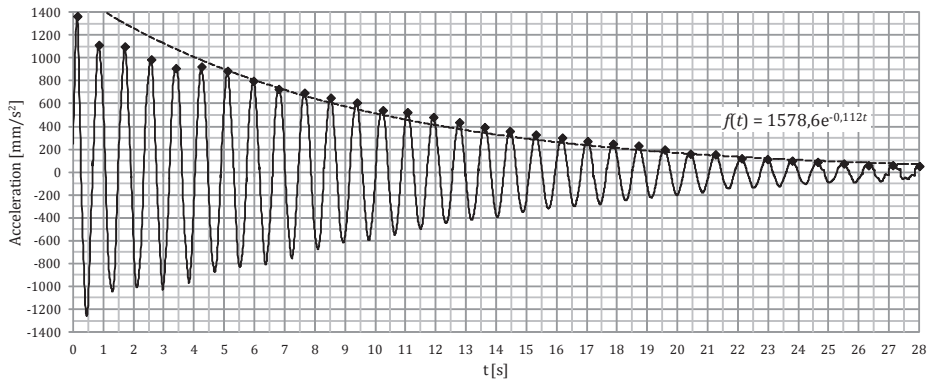
szerokości pasma (ang. half-power bandwidth), w której wartość logarytmicznego dekrementu tłumienia konstrukcyjnego drgań uzyskiwana jest na podstawie analizy widmowej sygnału, na podstawie poniższej zależności (wg [6]), oraz rys. 4. Metoda ta jest właściwa dla konstrukcji o pojedynczych lub wyraźnie odseparowanych częstotliwościach drgań własnych, a więc także dla przedmiotowych wież kratowych.

$$\delta_s = \pi \frac{\Delta n}{n_1} \quad (9)$$



Rys. 4. Wyznaczanie logarytmicznego dekrementu tłumienia na podstawie analizy widmowej.

Drugą ze stosowanych równolegle metod wyznaczania logarytmicznego dekrementu tłumienia drgań jest metoda krzywej zaniku drgań (metoda filtracyjno – regresyjna wg [6]). Polega ona na wyznaczeniu krzywej zaniku drgań $f(t)$ (rys. 1) z uzyskanego, przefiltrowanego sygnału, właściwego dla rozpatrywanej częstotliwości drgań własnych.



Rys. 5. Przykład zastosowania metody krzywej zaniku drgań do wyznaczenia logarytmicznego dekrementu tłumienia konstrukcyjnego

Krzywa zaniku drgań $f(t)$ dopasowywana jest tu metodą najmniejszych kwadratów (przykład na rys. 5), a opisać ją można następującym równaniem wykładniczym:

$$f(t) = Ae^{-\beta t} \quad (10)$$

gdzie β jest współczynnikiem tłumienia drgań, który zapisać można wg [6] w postaci:

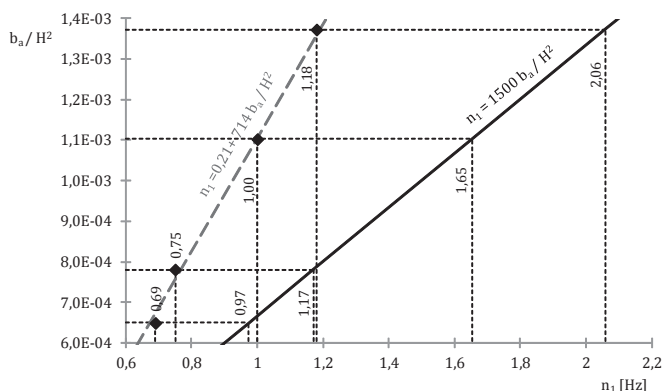
$$\beta = \frac{\delta_s}{T} \quad (11)$$

gdzie T jest okresem drgań własnych. Znając parametr β dopasowanej krzywej oraz wyznaczoną wcześniej częstotliwość drgań własnych, korzystając z równania (11),

wyznacza się wartość logarytmicznego dekrementu tłumienia konstrukcyjnego drgań δ_s .

4. Omówienie uzyskanych wyników pomiarów

Do chwili obecnej autorzy opracowali wyniki pomiarów przeprowadzonych na dwunastu wieżach o wysokości od 25 do 50 m. Wśród nich są zarówno trzony o podstawie trójkąta równobocznego (5 wież) jak i kwadratowej (pozostałe). Cztery z tych obiektów to konstrukcje nie zawierające istotnych elementów wyposażenia. Zestawiając wyniki pomiarów dla tych wież, w odniesieniu do zależności (6), uzyskano pewną zgodność, proponując możliwość skorygowania przytoczonego wzoru empirycznego, co przedstawiono na rys. nr 6 poniżej. Zaznaczyć przy tym należy, że zaproponowanej funkcji nie można uogólniać, gdyż wyprowadzona została dla wąskiej grupy specyficznych obiektów (stosunkowo lekkich wież o małej sztywności trzonów). Poza tym, ustalone doświadczalnie częstotliwości drgań własnych wykorzystywane są przez autorów w obliczeniach oraz umożliwiają weryfikację modeli komputerowych analizowanych wież.



Rys. 6. Wyniki pomiarów częstotliwości drgań własnych wież w pierwszej postaci, w odniesieniu do wartości wyznaczanych ze wzoru empirycznego (6) oraz możliwość jego korekty (opis w tekście)

Wyznaczone doświadczalnie wielkości charakteryzujące tłumienie wież kratowych pozostawia się jednak w chwili obecnej jako pozbawione możliwości szerszej interpretacji. Można jedynie powiedzieć, że uzyskane wartości logarytmicznego dekrementu tłumienia konstrukcyjnego drgań mieszczą się od wartości 0,04 dla wież sztywnych, do blisko 0,20 dla tych bardziej podatnych. Zauważalne są przy tym rozbieżności wartości uzyskiwanych na bazie dwóch opisanych wyżej metod. Do szerszej interpretacji wyników wymagana jest jednak większa liczba badanych obiektów, a także opisana wyżej, planowana modyfikacja metodyki bezpośredniego prowadzenia pomiarów.

5. Podsumowanie

W pracy opisano możliwość przeprowadzenia pomiarów charakterystyk dynamicznych stalowych wież kratowych, jako jedną z metod doświadczalnych dopuszczanych normami Eurokod. Uzyskane do tej pory wyniki badań wskazują na możliwość sformułowania empirycznych zależności określających wartość częstotliwości drgań własnych wież w pierwszej postaci oraz potwierdzają znaczne rozbieżności odpowiadających im wartości logarytmicznego dekrementu tłumienia konstrukcyjnego drgań, zaczerpniętych z różnych źródeł literatury. Niezbędne są kolejne pomiary, w tym takie, które prowadzone będą z kontrolą wielkości amplitudy początkowej drgań wymuszanych impulsowo. Autorzy planują dalsze badania w tym zakresie, a ich wyniki przedstawią w przyszłych publikacjach.

Literatura

- 1 Skwarek M., Hulimka J. Obciążenia w obliczeniach stalowych wież kratowych na podstawie norm Eurokod. Szersze spojrzenie. Inżynier Budownictwa nr 3/2012, s.76-80.
- 2 Skwarek M., Hulimka J. Wybrane problemy wyznaczania obciążenia wiatrem wież kratowych w ujęciu norm PN-EN, Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej, Budownictwo i Inżynieria Środowiska, z.58 (3/11/II), Rzeszów 2011, s.299-306.
- 3 PN-EN 1993-3-1:2008 Eurokod 3. Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 3-1: Wieże, maszty i kominy. Wieże i maszty.
- 4 PN-EN 1990:2004 Eurokod. Podstawy projektowania konstrukcji.
- 5 PN-EN 1993-3-2:2008 Eurokod 3. Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 3-2: Wieże, maszty i kominy – Kominy.
- 6 Szulej J. Wyznaczenie ekwiwalentnego tłumienia drgań w konstrukcjach wielomateriałowych. Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin 2010.
- 7 Kawecki J., Kowalska A. Tłumienie drgań w opisie sztywnościowo – bezwładnościowym. Czasopismo Techniczne, Z. 11. Budownictwo z. 3-B. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, 2010, s. 43-50.
- 8 PN-EN 1991-1-4:2008 Eurokod 1. Oddziaływania na konstrukcje. Część 1-4: Oddziaływania ogólne. Oddziaływania wiatru.
- 9 Giergiel J. Tłumienie drgań mechanicznych. PWN, Warszawa 1990.
- 10 PN-77/B-02011 Obciążenia w obliczeniach statycznych. Obciążenie wiatrem.
- 11 Żurański J.A. Obciążenia wiatrem budowli i konstrukcji. Arkady, Warszawa 1978.
- 12 Madugula M.K.S. Dynamic response of lattice towers and guyed masts. SEI, ASCE, 2002.
- 13 Glanville M.J., Kwok K.C.S., Denoon R.O. Full-scale damping measurements of structures in Australia. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 59 (1996) 34-364.
- 14 Holmes J.D., Schafer B.L., Banks R.W. Wind-induced vibration of a large broadcasting tower. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 41-44 (1992) 2101-2109.
- 15 Pagnini L.C., Solari G. Damping measurements of steel poles and tubular towers. Engineering Structures 23 (2001) 1085-1095.
- 16 Holmes J.D. Wind loading of structures. Taylor & Francis, 2007.
- 17 PN-79/B-03204 Konstrukcje stalowe. Maszty oraz wieże radiowe i telewizyjne. Obliczenia statyczne i projektowanie.

Dynamic characteristics measurements as a part of design assisted by testing in estimation of the steel latticed towers wind loading according to Eurocode

Marcin Skwarek¹, Jacek Hulimka²

¹ *Pracownia Projektowa M.Skwarek J.Hulimka Sp. J., e-mail: marcin.skwarek@pracowniaprojektowa.com.pl*

² *Department of Structural Engineering, Faculty of Civil Engineering, Silesian University of Technology, e-mail: jacek.hulimka@polsl.pl*

Abstract: Previous authors' publications, related to the analysis of steel lattice towers, describe some problems connected with it, especially ones referring to the calculations made according to the past Polish Standards. This paper presents the possibilities of measuring the dynamic characteristics of towers, as one of experimental methods allowed in Eurocode, practicable in verification of load capacity of existing structures.

Keywords: steel latticed towers, wind loads of latticed towers.